

第三章 常用计算的基本理论和 方法



上海电力学院电力与自动化学院
《发电厂电气主系统》课程组

学习要求

- 知道什么叫长期发热、短期发热；
- 掌握动、热稳定工程实用计算条件；

§ 3-1 导体载流量和运行温度计算

一、概述

1、导体和电器运行中的两种工作状态：

正常运行状态——长期发热状态；

短路状态——短时发热状态。

2、发热的危害

- 机械强度下降；接触电阻增加；绝缘性能降低

3、最高允许温度

为了保证导体可靠地工作，须使其发热温度不超过一定的数值。这个限值就叫做**最高允许温度**。

- 导体正常最高允许温度： $+70^{\circ}\text{C}$ ；计及太阳辐射： $+80^{\circ}\text{C}$ ；镀锡： $+85^{\circ}\text{C}$
- 短时最高允许温度：硬铝及铝锰合金取 200°C ；硬铜取 300°C 。

二、导体的发热与散热

一、发热

电阻损耗、金属构件的磁滞涡流损耗和介质损耗、太阳辐射都会引起发热，真正起作用的是电阻损耗 (Q_R) 和太阳辐射 (Q_S)。

二、散热

就其物理本质而言，可分为对流 (Q_c)、辐射 (Q_r)、导热 (Q_d) 三种形式，其中导热一般很小，可以忽略不计。

三、导体的长期发热

1、导体的温升过程

- 在升温过程中，导体产生的热功率 (Q_R)，一部分用于导体本身温度升高所需的热量 (Q_w)，一部分散失到周围介质中 ($Q_c + Q_r$)。由此可得热功率平衡方程式

- 求解可得升温过程的表达式：

$$Q_R = Q_w + Q_c + Q_r \quad (\text{W/m})$$

- 升温过程按指数曲线变化，3~4周期时趋于稳定温升。

$$\tau = \tau_s (1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) + \tau_i e^{-\frac{t}{T_i}}$$

2、导体的载流量

稳定温升：
$$\tau_s = \frac{I^2 R}{\alpha F}$$

载流量：
$$I = \sqrt{\frac{\alpha F (\theta_s - \theta_0)}{R}}$$

□ 提高载流量的方法

- 1) 采用电阻率小的材料；
- 2) 导体形状：相同截面积，矩形、槽形的表面积比圆形大；
- 3) 布置方式：矩形导体竖放比横放散热好。
- 4) 导体表面涂层。

四、大电流导体附近钢构的发热

1、大电流导体附近钢构发热的原因、危害及最高允许温度

- 1) 原因：导体中通过交流电时，导体周围出现强大的交变磁场，使附近钢构中产生很大的磁滞和涡流损耗，钢构因此发热。
- 2) 危害：钢构温度升高后，可以使材料产生热应力而引起变形，或使接触连接损坏。混凝土中的钢筋受热膨胀，可能使混凝土发生裂痕。
- 3) 钢构发热的最高允许温度：
 - 人可触及的钢构：70度；
 - 人不可触及的钢构：100度；
 - 混凝土中的钢筋：80度。

2、减少钢构损耗和发热的措施

- 1) 加大钢构与导体之间的距离；
- 2) 断开闭合回路；
- 3) 采用电磁屏蔽
- 4) 采用分相封闭母线

§ 3-2 导体的短时发热

一、短时发热过程

短时发热的特点：发热时间很短，基本是绝热过程，即导体产生的热量，全部用于使导体温度升高。由于导体温度升得很高，电阻和比热容会随温度而变，不能作为常数对待。

$$Q_R = Q_w$$

在时间 dt 内，由上式可得

$$I_{kt}^2 R_{\theta} dt = mc_{\theta} d\theta \quad (\text{J/m})$$

推导后可得：

$$\frac{1}{S^2} \int_0^{t_k} I_{kt}^2 dt = A_f - A_i$$

$$\text{令 } Q_k = \int_0^{t_k} I_{kt}^2 dt$$

$$A_f = \frac{1}{S^2} Q_k + A_i$$

导体材料及开始温度 θ_k 确定后，可以算出 A_k ，用复化辛普生算法算出短路产生的热效应 Q_k ，然后根据材料 A 值与温度 θ 的关系曲线，查出导体短时发热最高温度。

二、热效应的计算法

$$Q_k = Q_p + Q_{np}$$

1) 周期分量的热效应

$$Q_p = \int_0^{t_k} I_{pt}^2 dt = \frac{t_k}{12} (I''^2 + 10I_{\frac{t_k}{2}}^2 + I_{t_k}^2)$$

2) 非周期分量的热效应

$$Q_{np} = TI''^2$$

T——非周期分量等效时间 (s)。

如果短路电流切除时间 $t_k > 1s$ ，非周期分量的影响忽略不计。

不同短路点等效时间常数 T 的推荐值

短 路 点	T (s)	
	$t_k \leq 0.1s$	$t_k \geq 0.1s$
发电机出口及母线	0.15	0.2
发电机升高电压母线及出线 发电机电压电抗器后	0.08	0.1
变电所各级电压母线及出线	0.05	

§ 3-3 导体短路的电动力

一、计算短路电动力的原因

- 电力系统短路时，导体中通过很大的短路电流，导体会遭受巨大的电动力作用。如果导体的机械强度不够，就会发生变形或损坏。

二、三相导体短路的电动力

1、 电动力的最大值

1) F_A 的最大值出现在 $\varphi_A = (n - \frac{7}{12})\pi, n = 1, 2, \dots$; 短路发生后的最初半

个周期 $t = 0.01s$; 冲击电流 $i_{sh} = 1.82I_m = 1.82 \times \sqrt{2}I''$ 。

$$F_{A\max} = 1.616 \times 10^{-7} \frac{L}{a} i_{sh}^2$$

2) F_B 的最大值出现在 $\varphi_B = \pm(\frac{n}{2} - \frac{1}{4})\pi + \frac{4\pi}{6}, n = 1, 2, \dots$; 短路发生后的最初半个周期 $t = 0.01s$; 冲击电流 $i_{sh} = 1.82I_m = 1.82 \times \sqrt{2}I''$ 。

$$F_{B \max} = 1.732 \times 10^{-7} \frac{L}{a} i_{sh}^2$$

3) 两相短路和三相短路最大电动力比较

由于 $\frac{I''^{(2)}}{I''^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$, 故

$$F_{\max}^{(2)} = 2 \times 10^{-7} \frac{L}{a} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_{sh}\right)^2 = 1.5 \times 10^{-7} \frac{L}{a} i_{sh}^2$$

故，最大电动力出现在三相短路，中间相，短路发生后最初半个

半个周期，临界初相角 $\varphi_B = \pm\left(\frac{n}{2} - \frac{1}{4}\right)\pi + \frac{4\pi}{6}, n = 1, 2, \dots$

$$F_{\max} = 1.732 \times 10^{-7} \frac{L}{a} i_{sh}^2$$

1、 导体振动的动态应力

共振现象：导体及其支架组成一弹性系统。当受到一次外力作用时，就按照一定频率在其平衡位置上下运动，形成固有振动，其振动频率称为固有频率。电动力中有工频和量倍工频两个分量。如果导体结构的固有频率接近这两个频率之一时，就会出现共振现象，甚至能使导体及其构架损坏。

凡连接发电机、主变压器以及配电装置中的导体均属于重要回路，这些回路需要考虑共振的影响。

导体发生共振时，导体内部会产生动态应力。对于动态应力的考虑，一般采用修正静态计算法，即在最大电动力 F_{\max} 上乘以动态应力系数 β （ β 为动态应力与静态应力之比），以求得实际动态过程中动态应力的最大值。

$$F_{\max} = 1.732 \times 10^{-7} \frac{L}{a} i_{sh}^2 \beta$$

动态应力系数与固有频率有关。

固有频率在中间范围时， $\beta > 1$ ，动态应力较大，当固有频率较低时， $\beta < 1$ 。固有频率较高时， $\beta \approx 1$ 。

对屋外配电装置中的铝管导体，取 $\beta = 0.58$

对重要导体，当固有频率在下述范围以外，取 $\beta = 1$ ：

单条导体及一组中的各条导体 35~135HZ

多条导体及有引下线的单条导体 35~155HZ

槽形和管形导体 30~160HZ